

充電式心臓ペースメーカーを想定した非接触充電システムの構築に関する研究

著者	佐藤 拓
号	51
学位授与番号	3755
URL	http://hdl.handle.net/10097/37423

氏 名	さ と う た く
授 与 学 位	佐 藤 拓 博士 (工学)
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	充電式心臓ペースメーカを想定した非接触充電システムの構築 に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 松木 英敏
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 松木 英敏 東北大学教授 金井 浩 東北大学教授 吉澤 誠 東北大学助教授 佐藤 文博

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

心臓ペースメーカは心疾患のうち徐脈性不整脈患者に対して絶大な治療効果をもたらす植え込み術である。日本では40万人以上がすでに心臓ペースメーカを使用しており、年間5万人以上の人植え込み手術を受けている。毎年5-10%の割合で植え込み数は増加している。国内における年間ペースメーカ植え込み件数の3割(1999年)が装置の交換手術によるものである。世界規模で見た場合には心臓ペースメーカは年間100万件以上の植え込み手術が行なわれている。心臓ペースメーカ本体の値段はおおよそ150万円と高額な植込み装置であり、日本における心臓ペースメーカの市場規模は465億円(2004)である。これは医療機器において最大の市場規模である。心臓ペースメーカやICD(植込み型除細動器)は、全てが海外製品であり日本は100%輸入(主に米国から)に頼っているのが現状である。

近年は電池の大容量化が進み、心臓ペースメーカの装置寿命は延びつつあるがそれでも8-10年と不十分である。心臓ペースメーカなどの植込み装置は完全密閉構造のため電池交換ができない。すなわち電池消耗の度に装置本体を交換しなければならず、これは患者への負担(交換手術, 医療費)や経済性の面からデメリットとなっている。

筆者は心臓ペースメーカに代表される充電式体内植込み装置を想定した非接触充電システムの構築に関する検討を進めてきた。装置寿命を延長する手段としては1次電池の大容量化や新たな電池の開発, 充電式の採用が考えられる。患者への負担(交換手術, 医療費)のみならず環境資源や経済性の観点から今後は充電式が主流になると考える。

以上の背景より、心臓ペースメーカなどのすべての植込み装置において最大の課題が「装置寿命の延長」である。そこで装置寿命の延長の手段として本研究では非接触充電システムに着目した。本論文は全6章から成る。既存のペースメーカケースを用いた場合の非接触電力伝送系を構築し、さらに低発熱を実現する充電式ペースメーカに特化したケース形状を提案し、非接触充電システムを構築した。

第 2 章 充電式心臓ペースメーカーの構想

本章では心臓ペースメーカーの歴史背景と現状について説明し、今後必要になると考える充電式ペースメーカーの構想について述べる。

図 1 は充電式心臓ペースメーカーの構想図である。本研究における充電式心臓ペースメーカーの充電仕様（開発目標）は、

- (1) 充電回数：年 1-2 回（ペースメーカークリニック時）
- (2) 充電時間：1-2 時間
- (3) 2 次電池：リチウムポリマ（75 mAh～）
- (4) 充電電力：最大 0.4 W（DC 4 V, 100 mA）
- (5) 伝送ギャップ：最大 20 mm
- (6) 伝送効率 50 %

である。関連する他の研究グループ（大分大学，西村氏，10 mm で 2 次側 0.17 W 供給時に伝送効率 22 %）と比較して，伝送電力は 2 倍，伝送ギャップは 2 倍，効率は 2 倍以上を目標とした。伝送効率 50 % という数値は，体内発熱に関する安全性確保，経済性や携帯型充電器による充電スタイルまでを視野に入れた場合において実用化可能なコイル間伝送効率として概算したものである。

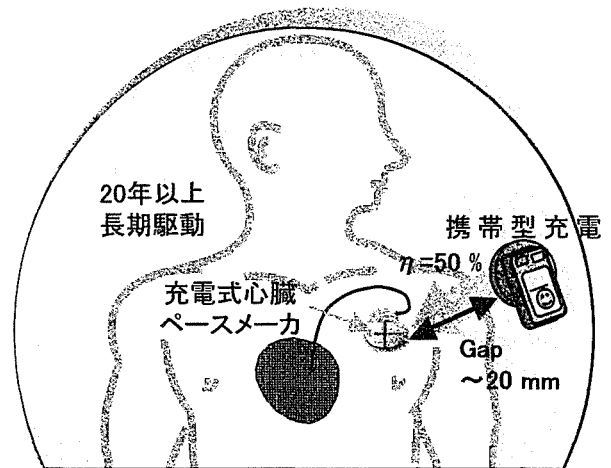


図 1 充電式ペースメーカーの構想図

第 3 章 金属ケース内配置を想定した非接触電力伝送コイル設計

本章では充電式ペースメーカーを想定した非接触電力伝送コイル設計を行なうための様々の検討結果について述べる。

チタンが有る場合において非接触電力伝送を設計するために等価回路を検討した。チタンケースがある場合の実測値を導入することで渦電流損を無視した等価回路から最適負荷を導出できることを示した。2 次側回路にリアクタンス補償を行なうことで，伝送効率を 8.4 %（リアクタンス補償無し）から 14.0 %（リアクタンス補償有り）まで 1.6 倍程度改善できることを確認し，チタンが介在する場合にもリアクタンス補償による伝送効率の改善が有効であることを示した。

続いてコイル設計指針を示した。筆者は 2 次側コイル形状としてケース内壁配置型コイルを提案した。この形状により限られたチタンケース内空間でコイル寸法を最大限大きくできるためコイル間の結合係数が向上し電力伝送面で有利なコイル形状を実現した。1 次コイルは平面スパイラル形状とすることで 2 次コイルとの位置ずれに対して伝送効率の低下が穏やかになるような特性とした。また，伝送効率は 1 次コイル内径に依存し極大点を持ち，本 2 次コイルとの組み合わせにおいて 1 次コイル内径 28 mm で伝送効率の極大値を得た。

コイル設計指針に従って非接触電力伝送コイルを試作した。第 1 試作において伝送効率 22-32 %（gap 10-20 mm）を得た。水中モデルを用いた発熱評価では 90 分の非接触充電においてチタンケース表面の温度上昇は 1.2 °C 程度であり，「生体内での温度上昇の上限 2 °C」（ISO 規定）を満たす結

果を得た．さらに電力伝送コイルの改良の結果，26-40 % (gap10-20 mm) を達成した．

第 4 章 充電式心臓ペースメーカー用ケース形状の検討

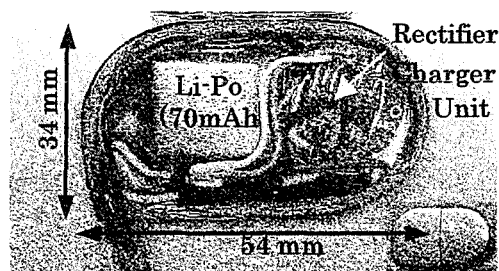
本章では既存のケース形状にとらわれない低発熱かつ電力伝送に適した充電式心臓ペースメーカーのケース形状について検討結果について述べる．コンピュータシミュレーションを用いてチタンケースに生じる渦電流損を解析し低減方法を検討した．現状よりもケースの渦電流損を 1/2 にできれば効率 50 %が期待できることを見積もった．分割モデルの解析より渦電流路を 2 分割することで渦電流損 (発熱) を 1/2 まで低減できることが分かり，実際に 2 分割ケースを作成し検証した結果，約 1/2 の発熱低減と伝送効率 52 %を得た．その他には扁平形状による小型化が電力伝送に有利であることを示した．ケース形状を工夫することで発熱を従来の 1/4 に，伝送効率 55 %程度が見込めることをシミュレーションで示した．

第 5 章 心臓ペースメーカー用非接触充電システムの試作

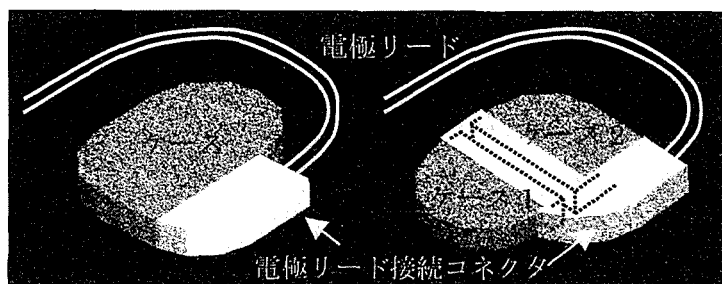
本章では心臓ペースメーカー用非接触充電システムの試作を行い，充電システムの動作評価の結果について述べる．図 2 に充電式心臓ペースメーカー用ケース形状を提案する．この形状により渦電流損による発熱を 1/2 に低減でき，伝送効率 50 %が得られる．図 3 は試作したペースメーカー用非接触充電システムである．電力伝送効率 50 %を確保し，非接触電力伝送による充電動作を確認した．非接触充電中のケース温度上昇は 3 °C (空气中) であり，生体内では大きな放熱が期待できることから安全な発熱レベルであると判断する．携帯型充電器の実現に向けて，1 次側からの 2 次側内部推定 (インピーダンス推定) による電池残量モニタリングシステムを提案した．

第 6 章 結言

本章は第 5 章までの内容をまとめている．本研究により電力伝送効率 (50 %)，発熱レベル (水中評価 1 °C 以内) のペースメーカー用非接触充電システムを構築した．本システムはペースメーカーのみならず 他的小型植込み機器にも適用可能であり，装置の長期利用が実現できると考える．



(a) 体内側充電システム



(a) 既存の形状

(b) 提案形状 (充電式)

図 2 充電式心臓ペースメーカー用ケース形状．



(b) 携帯型充電器 (体外)

図 3 ペースメーカー用非接触充電システム．

論文審査結果の要旨

心臓ペースメーカは一次電池を電力源とし、我が国だけでも 40 万人以上が使用する完全埋込医療装置である。一方、その埋込手術の約 3 割は内蔵電池の寿命等による交換手術である。今後、高齢化社会の進展と共にその割合は増加の一途をたどることが予想されるが、装置寿命を飛躍的に延ばす可能性のある充電式心臓ペースメーカは金属ケースの介在する装置に対する非接触充電技術が確立されていないため世界的に見ても未だ実用化に至っていない。

本論文はこのような完全埋込式心臓ペースメーカに対する非接触電力伝送システムの構築を目的としたものであり、全編 6 章より成る。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、心臓ペースメーカの歴史背景と現状について述べ、充電式心臓ペースメーカに求められる仕様について検討し、あわせて非接触充電系の開発に必要な事項について明らかにしている。

第 3 章では、充電式ペースメーカに対する非接触電力伝送系の構成について述べている。始めに等価回路的手法を用いた検討を行い、適切なコイル設計に基づく電磁誘導方式によって、金属ケースが介在する場合に有効な非接触電力伝送系が実現できることを示している。次に、検討結果に基づく試作を行い、ケース表面で温度上昇値を 1.2°C に抑制できることを実証している。これは、本方式の実用性を示すものとして高く評価される。

第 4 章では、コンピュータシミュレーションによって、既存のケース形状にとらわれない、低発熱かつ電力伝送に適した充電式心臓ペースメーカのケース形状について検討している。その結果、電力伝送に伴う損失をこれまでの報告の半分以上に抑制可能であること、さらに、将来の電子回路部分の省スペース化と組み合わせれば 1/4 にまでも損失の低減が可能であることを明らかにしている。これは充電式ペースメーカの将来の指針を示したものであり有用な成果である。

第 5 章では、前章までに明らかにした、損失を 1/2 に低減できる充電式ペースメーカ用ケースを採用し、内部に充電用二次電池及び周辺回路を組み込んだ非接触充電システムの試作を行った結果について述べている。試作システムは所期の性能を示し、繰り返し充放電試験の結果から、埋め込んだ際に生体内で十分安全な発熱レベルに抑えられることを確認している。さらに、電池残量や回路動作を充電中に外部から非接触で監視できる手法についても提案し、実際に試作システムを用いて、電池残量の推定が可能であることを示している。これらの結果は、実用可能な心臓ペースメーカ用非接触充電システムの構築が可能であることを示すもので、きわめて有用な成果である。

第 6 章は結言である。

以上要するに本論文は、心臓ペースメーカなどに適用可能な非接触充電システムを構築し、装置の長期利用実現の可能性を示したものであり、体内埋込機器の進歩に貢献し生体電磁工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。